

Influence du comportement plastique de la structure sur l'état limite ultime dans les problèmes d'interaction sol-structure

Sylvain Plumey

1. Introduction

Il existe un certain nombre d'incertitudes sur le comportement des tranchées couvertes liées en grande partie à la nature même de ces ouvrages composés de trois éléments principaux, le sol de fondation, la structure en béton armé et le remblai. La présence d'interfaces et de fortes interactions entre ces trois parties au comportement très différent complique la modélisation et l'analyse de l'ensemble du système.

Les méthodes d'analyse actuelles considèrent souvent la structure comme un élément élastique linéaire. Cette hypothèse, acceptable à l'état limite de service, n'est pas valable à l'état ultime qui est généralement caractérisé par une fissuration importante et par la plastification de certaines parties de la structure. En conséquence, des redistributions considérables des efforts dans la structure et des contraintes dans le massif sont probables, celles-ci pouvant avoir de grandes influences sur le comportement global de l'ouvrage à l'état ultime. La prise en compte du comportement plastique de la structure paraît par conséquent indispensable pour décrire et caractériser de façon adéquate l'état ultime de ce type d'ouvrage. Les bases du dimensionnement, soit la connaissance des modes de rupture potentiels, ne sont pas connues avec précision, ce qui rend difficile un dimensionnement rationnel de la structure.

Le projet de recherche mené actuellement par l'IS-BETON à l'EPFL, conjointement avec les LMS, LMR et LSC, vise à caractériser le comportement effectif des tranchées couvertes à l'état limite ultime en tenant compte au mieux du comportement réel des différents composants de ce type d'ouvrages.

La problématique évoquée précédemment est illustrée ci-après à travers un cas fondamental de la mécanique des sols, la fondation superficielle infiniment longue sur sol purement cohésif non pesant soumise à une charge centrée. Cet exemple présente de fortes analogies avec la fondation du mur central d'une tranchée couverte à deux tubes. Dans un premier temps, l'influence du comportement plastique de la fondation sur la capacité portante du système est examinée. Ensuite, les conséquences indirectes de ce comportement sur l'état limite de service sont présentées.

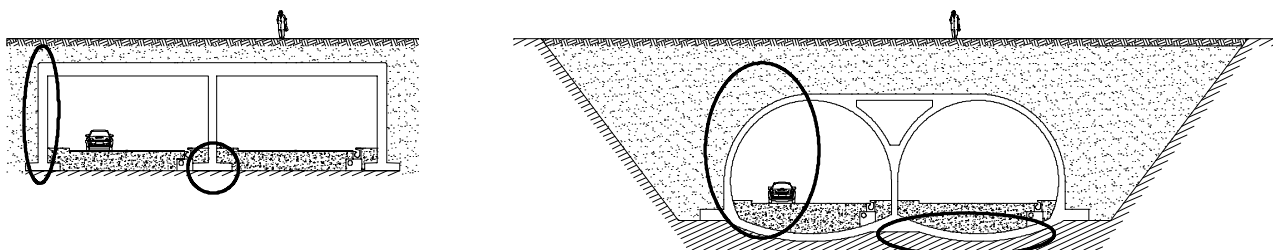


Fig. 1. Interaction sol-structure dans les tranchées couvertes

2. Capacité portante d'une fondation superficielle sur sol purement cohésif non pesant

2.1. Fondation de résistance infinie

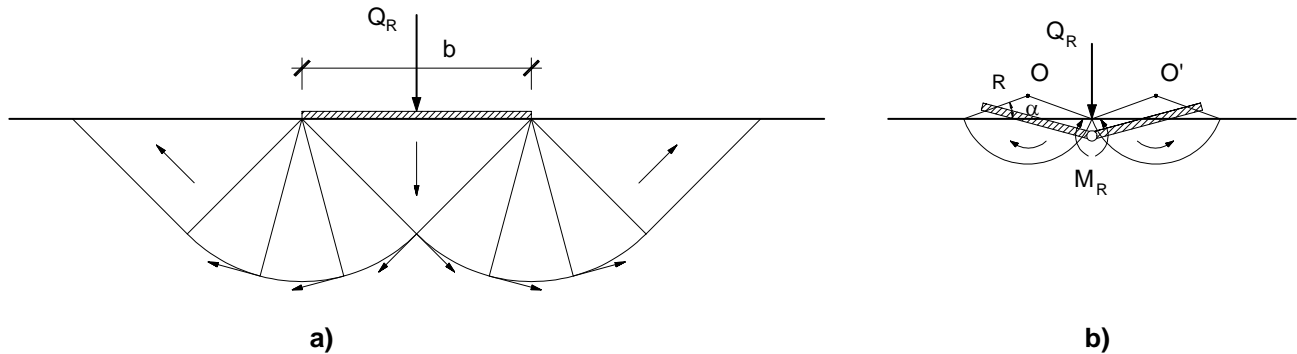
La détermination de la capacité portante de la fondation infiniment longue soumise à une charge centrée à fait l'objet de nombreuses études (Terzaghi, Prandtl, Hill,...). On considère ici le cas d'une fondation parfaitement rugueuse sur un sol purement cohésif non pesant et on admet que le sol se comporte selon une loi élastique parfaitement plastique obéissant au critère de Mohr-Coulomb. Une loi d'écoulement plastique associée est admise.

Un mécanisme de rupture admissible est donné par le mécanisme de Prandtl représenté à la figure 2.a. On peut calculer la charge ultime du système en se basant sur l'approche cinématique de la théorie de l'analyse limite. Celle-ci consiste à imposer un déplacement infinitésimal selon le mécanisme choisi et à exprimer que la somme des travaux virtuels des charges extérieures est égale à la dissipation d'énergie interne dans le

système. Pour le mécanisme considéré, la dissipation d'énergie se produit par plastification de certaines zones du sol. La charge ultime ainsi obtenue est donnée par la relation (1) (voir [1,2]).

$$Q_R = 5.14 \cdot b \cdot c \quad \text{où } c \text{ est la cohésion du sol} \quad (1)$$

Selon la théorie de la plasticité, l'approche cinématique fournit une borne supérieure de la capacité portante du système (théorème cinématique de l'analyse limite). On peut montrer que la charge ultime obtenue précédemment est en fait la solution exacte du problème posé (voir [1,2]), c'est-à-dire qu'il existe un champ de contraintes qui satisfait les conditions aux limites et pour lequel la résistance des matériaux n'est dépassée en aucun point du massif du sol et de la fondation (théorème statique de l'analyse limite).



**Fig. 2. Mécanismes de rupture : a) mécanisme selon Prandtl
b) mécanisme avec formation d'une rotule plastique**

2.2. Fondation de résistance finie

On admet maintenant que la fondation suit également une loi élastique parfaitement plastique. En admettant que la répartition des pressions de contact est uniforme sous la fondation à la ruine, le moment de flexion maximal sollicitant la fondation sous la charge définie par (1) est donné par la relation 2.

$$M_{\max} = 5.14 \cdot c \cdot \frac{b^2}{8} \quad (2)$$

Dans le cas où la fondation n'est pas en mesure de résister à cette sollicitation, c'est-à-dire si le moment résistant M_R est plus petit que M_{\max} , la solution donnée par (1) ne constitue plus la solution exacte du problème puisque la résistance des matériaux est dépassée dans la fondation. Cette solution est cependant une borne supérieure de la charge ultime.

La figure 2.b présente un mécanisme admissible qui admet la formation d'une rotule plastique dans la fondation. La présence de la rotule plastique impose un mouvement de rotation à la fondation et au sol. On admet ici qu'il se forme deux surfaces de rupture d'une faible épaisseur dans le sol et que les deux régions circulaires délimitées par celles-ci subissent une rotation en bloc respectivement autour des centres O et O' . La dissipation d'énergie se produit le long des surfaces de rupture dans le sol, à l'interface entre le sol et la fondation, mais aussi dans la fondation dans la rotule plastique.

Après minimisation de la charge obtenue sous ce mécanisme en fonction des deux paramètres α et R , on peut montrer que la charge ultime peut être décrite par la relation (3).

$$Q_R = K \cdot \sqrt{\mu} \cdot b \cdot c \quad \text{avec } \mu = \frac{M_R}{b^2 \cdot c} \quad (3)$$

Le coefficient K dépend de la rugosité de la fondation. Pour une fondation parfaitement rugueuse, $K = 6.99$.

La formation de la rotule plastique induit le soulèvement d'une partie de la fondation qui se traduit par la diminution de la surface de contact avec le sol. Celle-ci s'accompagne d'une redistribution des pressions de contact vers une zone réduite centrée sous la charge appliquée.

2.3. Comparaison et conséquences pour le dimensionnement

La comparaison des charges ultimes prédites par les deux mécanismes considérés (relations (1) et (3)) est présentée à la figure 3. On constate que la résistance de la fondation a une influence sur la capacité portante du système sol-structure si elle est inférieure à une certaine valeur seuil. Dans ce cas, le mécanisme décrit à la figure 2.b est déterminant et le mécanisme de Prandtl fournit une borne supérieure de

la capacité portante de la fondation. La surestimation de la charge ultime selon ce mécanisme peut même devenir considérable pour des fondations de faible résistance comme le montre la figure 3.b. Lors de la vérification de la capacité portante d'un tel système, il est donc nécessaire de considérer le comportement plastique de la fondation en béton armé au même titre que celui du sol. La vérification de la sécurité structurale du sol et de la structure ne devrait par conséquent pas être effectuée de façon séparée comme c'est généralement le cas aujourd'hui. Une analyse commune tenant compte du couplage existant entre sol et structure doit être menée. L'uniformisation récente des normes de construction et de géotechnique [3] devrait permettre de surmonter une partie des difficultés qu'une telle approche représente. En effet, l'utilisation de coefficients partiels de résistance sur les caractéristiques mécaniques du sol et des matériaux de construction rend possible de travailler au niveau de calcul aussi bien pour la structure que pour le sol.

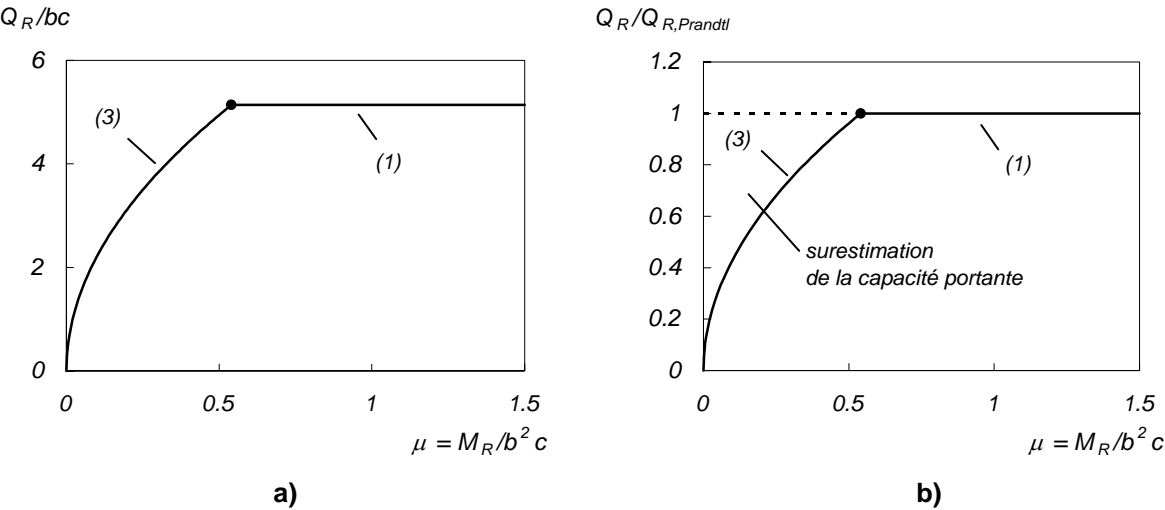


Fig. 3. Capacité portante de la fondation: a) évolution en fonction du moment résistant
b) rapport entre les deux charges ultimes

3. Etat limite de service et état limite ultime

3.1. Modélisation numérique

Dans le but de comprendre quelle est l'influence du comportement plastique de la fondation sur l'état limite de service, le problème discuté précédemment est modélisé par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel Z_soil [4]. La figure 4 présente la géométrie du cas traité et les caractéristiques mécaniques des différentes composantes présentes : le sol, la fondation et l'interface.

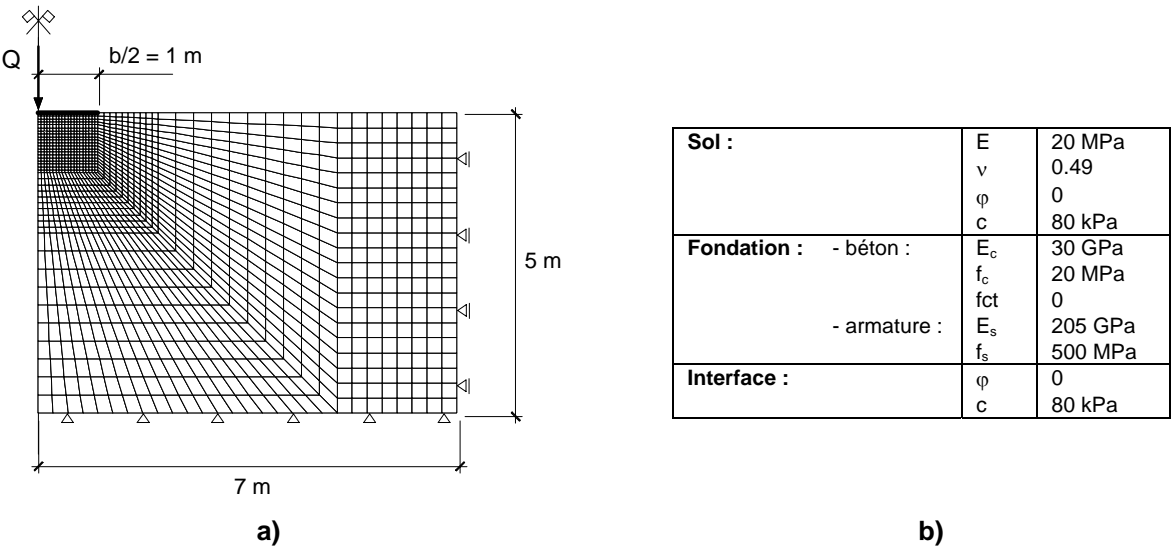


Fig. 4. Données du problème: a) maillage
b) caractéristiques mécaniques du modèle numérique

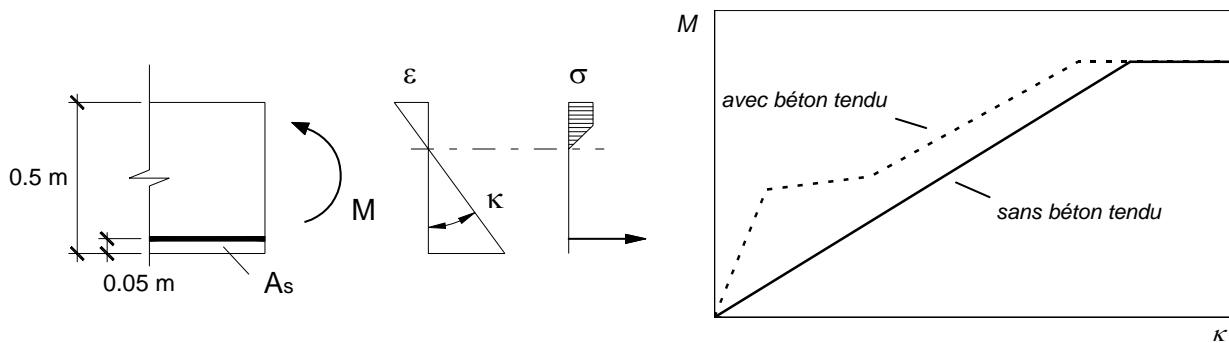


Fig. 5. Section de la fondation et représentation schématique de la loi moment – courbure

Le sol est modélisé par une loi élasto-plastique suivant le critère de Mohr-Coulomb. La fondation en béton armé est quant à elle modélisée par des éléments de type poutre multi-couches. Le comportement du béton armé est en fait approché par la superposition de plusieurs couches en béton ou en acier d'armature, chacune d'entre elles obéissant à une loi élasto-plastique unidimensionnelle. L'influence du béton tendu n'est pas considérée ici (voir figure 5). Le comportement de l'interface est simulé par des éléments de contact ne reprenant aucun effort de traction.

A titre de comparaison, la figure 6 montre que le modèle choisi est à même de suivre les relations théoriques (1) et (3) discutées précédemment.

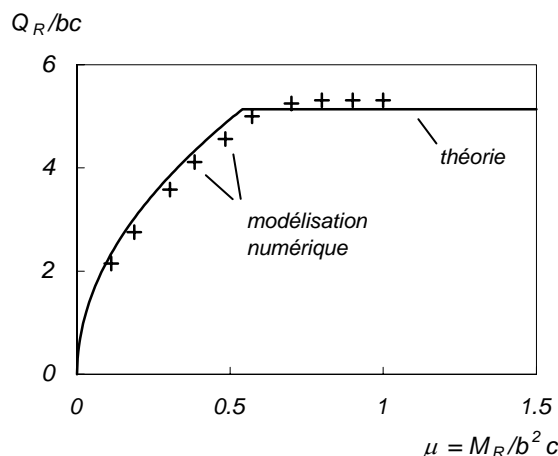


Fig. 6. Comparaison de la charge ultime théorique avec la modélisation numérique

3.2. Comportement charge - tassement

On considère trois fondations de résistance a) ($\mu = 0.2$), b) ($\mu = 0.4$) et c) ($\mu = 0.8$). Les résistances des fondations a) et b) sont choisies de sorte qu'une rotule plastique se crée avant la ruine. La résistance de la troisième fondation est quant à elle suffisante pour atteindre la ruine sans formation de rotule plastique. En augmentant progressivement la charge appliquée, il est possible de suivre la déformation du massif et plus particulièrement le tassement de la fondation mesuré sous la charge appliquée. La figure 7.a présente la courbe charge – tassement obtenue pour chacune des trois fondations.

Les trois courbes sont bien sûr identiques dans un premier temps caractérisé tout d'abord par une phase quasi-élastique. Les courbes divergent lorsque le moment maximal dans la fondation atteint la résistance de la fondation a) puis de la fondation b). Une rotule plastique se forme. Les pressions de contact se redistribuent et se concentrent sous la charge appliquée. Ceci a pour effet une augmentation rapide des contraintes dans le sol et par conséquent des déformations dans une zone réduite. La rigidité du système est donc passablement réduite dès que la rotule plastique se forme. La charge augmente ensuite jusqu'à ce que la rupture se produise dans le sol. On constate que la ruine de la fondation c) est atteinte pour une charge nettement supérieure aux fondations a) et b) mais pour des déformations très importantes.

La figure 7.b montre l'allure de ces courbes lorsque la charge est rapportée à la charge ultime de chaque fondation. On constate que l'allure de la courbe est considérablement influencée par la formation ou non d'une rotule plastique, donc par le comportement plastique de la fondation en béton armé.

A l'état limite de service, le tassement de la fondation doit être inférieur à une valeur admissible ($\Delta_{service}$). A cette limite correspond une charge qui représente la charge de service maximale qui peut être appliquée au système. Le rapport de cette charge avec la charge ultime du système donne une indication sur l'importance que l'état limite de service peut prendre par rapport à l'état limite ultime lors du dimensionnement de la fondation. Si ce rapport est faible, l'état de service est déterminant. Dans le cas contraire, c'est l'état limite ultime qui dicte le dimensionnement. On constate ici que ce rapport est influencé par la résistance de la fondation (figure 7.b). La réserve disponible séparant la charge de service maximale et la charge ultime diminue passablement lorsque la résistance de la fondation diminue. Pour les fondations a) et b) de l'exemple traité, l'état limite ultime devient probablement déterminant.

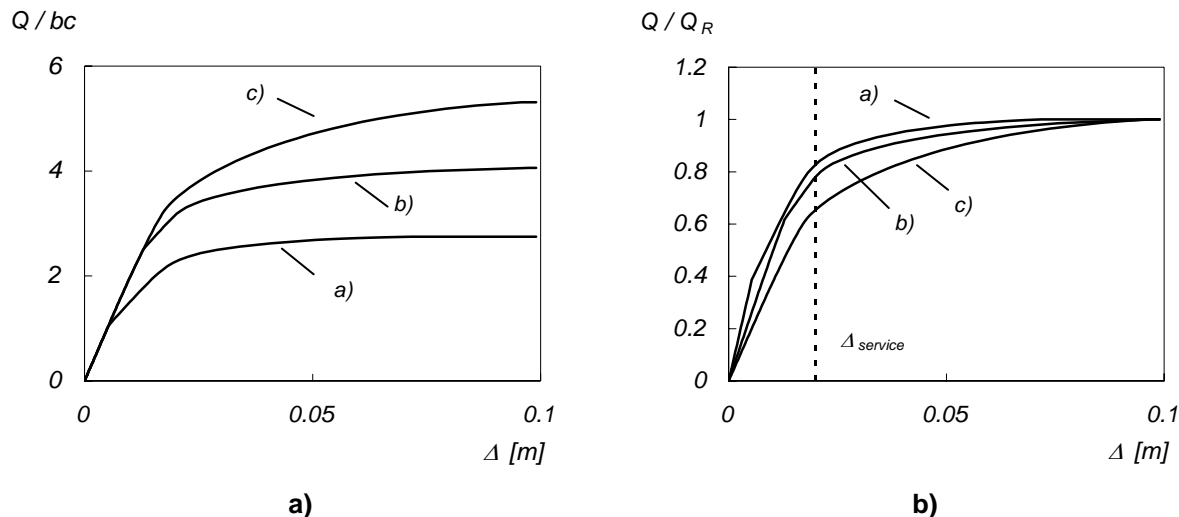


Fig. 7. Courbe charge – déplacement pour les trois fondations considérées

4. Conclusions

L'étude du cas fondamental de la fondation superficielle infiniment longue sur sol cohésif non pesant soumise à une charge centrée met en évidence l'influence du comportement plastique de la fondation sur le comportement global du système :

- la capacité portante de la fondation est réduite de façon significative lorsque la résistance de celle-ci est inférieure à une valeur seuil,
- la cinématique du mécanisme de rupture est fortement influencée par la formation d'une rotule plastique dans la fondation,
- la formation d'une rotule plastique a également des répercussions indirectes sur l'état limite de service. La réserve de résistance séparant la charge de service maximale et la charge ultime est influencée par la résistance de la fondation en béton armé.

Ces conclusions ne sont pas directement généralisables à tous les problèmes d'interaction entre le sol et une structure ; un travail sur le comportement des tranchées couvertes est en cours actuellement. Elles relèvent néanmoins la nécessité et l'importance de considérer le comportement élastique - plastique de la structure et du sol de manière couplée lors de l'analyse de tels systèmes.

5. Références bibliographiques

- [1] Chen W.F., Limit analysis and soil plasticity, developments in geotechnical engineering vol.7, 1975
- [2] Salençon J., Calcul à la rupture et analyse limite, 1983
- [3] Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA 260 – 267, édition 2003
- [4] Zace Service SA, Z-soil.PC user manual, 2003

Adresse de l'auteur : Ing. dipl. Sylvain Plumey
EPFL-Laboratoire de construction en béton
CH-1015 Lausanne

En collaboration avec Prof. Dr Aurelio Muttoni, Prof. Dr. Laurent Vulliet et Dr. Vincent Labiouse